

Методы определения характеристик полупроводниковых кремниевых детекторов заряженных частиц с использованием потока быстрых моноэнергетических нейтронов

С.В. Артемов^{1#}, А.Г. Бажажин^{2*}, О.Ш. Жураев¹, Ф.Х. Эргашев¹, В.А. Татарчук¹

¹ЛЯР ИЯФ АН РУз (г. Ташкент), #artemov@inp.uz; ²Сектор №1 Трековых детекторов НЭОМД ЛФВЭ ОИЯИ (г. Дубна), *bajajin@jinr.ru.

Введение

В ядерно-физических экспериментах на ускорителях для идентификации и спектрометрии заряженных частиц и в других задачах используются полупроводниковые кремниевые детекторы с толщинами от десятков микрометров до нескольких миллиметров. Используемые детекторы функционально делятся на два типа: детекторы ионизационных потерь (“пролетные” или полностью обедненные) и детекторы полного поглощения.

Основными характеристиками детекторов являются энергетическое разрешение и толщина чувствительной области. Энергетическое разрешение обычно определяется по спектрам α -частиц от образцовых α -источников. Для определения толщины чувствительной области используют источники конверсионных электронов, имеющих большую длину пробега в кремнии, но большой угловой и энергетический страгглинг часто не дает реализовать необходимую точность измерения.

Для случая больших толщин, где непригодно использование α - и конверсионных источников, создан метод её измерения с использованием потока быстрых моноэнергетических нейтронов с $E_n \sim 14$ МэВ, генерируемых нейтронным генератором НГ-150 ИЯФ АН РУз по реакции $T(d,n)^4He$.

Нейтронный генератор НГ-150 в ИЯФ АН РУз

$E_d = 150$ keV
Твёрдотельная TiD или TiT мишень
 $d+D \rightarrow ^3He+n$, $E_n \sim 2.5$ MeV
 $d+T \rightarrow ^4He+n$, $E_n \sim 14$ MeV



НГ-150 в железном кожухе



Пульты НГ-150

Основные технические данные НГ-150:

- Максимальный поток нейтронов $2 \cdot 10^{10}$ н/сек.
- Номинальная энергия ускоренных ионов 150 кэВ.
- Пределы регулировки энергии ионов 50-150 кэВ.
- Ток пучка ионов на мишени до 3 мА.
- Диаметр пучка на мишени в номинальном режиме 10-30 мм.
- Режим работы непрерывный.

Метод определения толщины чувствительного слоя и энергетического разрешения полупроводниковых кремниевых детекторов заряженных частиц используя поток нейтронов

Генерируемые монохроматические нейтроны имеют энергию (~ 14 МэВ), достаточную, чтобы на основном изотопе кремния ^{28}Si в чувствительной области детектора, облучаемого потоком нейтронов, интенсивно шли реакции $^{28}Si(n,p)^{28}Al$ и $^{28}Si(n,\alpha)^{25}Mg$, происходящих в материале детектора.

Для калибровки метода необходимы «реперные» кремниевые детекторы с известными характеристиками.

Высокоэнергетическая часть спектра образующихся частиц имеет линейчатый характер с четким разделением пиков. Количество событий в пиках, соответствующих образованию ^{25}Mg , при одинаковых условиях облучения определяется объемом детектора.

Обычное время экспозиции составляло ~ 10 минут при потоке нейтронов $2 \cdot 10^{10}$ с⁻¹ в угол 4л и расстоянии от источника (нейтронной мишени) порядка 50 см.

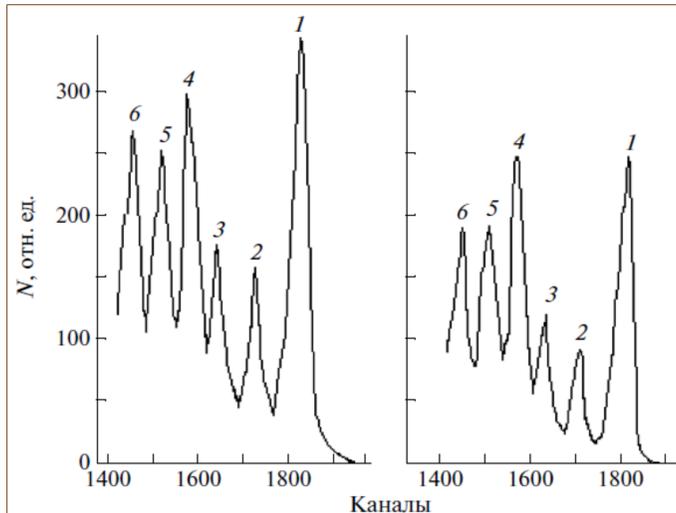


Рис. 1. Спектры продуктов реакций $^{28}Si(n,\alpha)^{25}Mg$ (1–3, 5, 6) и $^{28}Si(n,p)^{28}Al$ (4), полученные на нейтронном потоке НГ-150 с использованием двух кремниевых детекторов различного объема: спектр слева получен детектором, объем которого в 1.4 раза больше объема детектора, которому соответствует спектр справа.

В крайнем правом пике (соответствующем реакции $^{28}Si(n,\alpha)^{25}Mg_{соч.сочт.}$) спектра на рис.1а количество импульсов в 1.4 раза больше, чем в соответствующем пике спектра на рис.1б. Во столько же раз различаются объемы детекторов.

Толщина чувствительной области при этом определяется выражением:

$$W = k S_a / (Nd), \text{ где:}$$

S_a – число событий в пике;

N – отсчет монитора потока нейтронов, пропорциональный числу нейтронов, прошедших через детектор;

d – диаметр чувствительной зоны детектора;

k – коэффициент, определяемый при использовании реперного детектора известной толщины.

Таким образом, в потоке нейтронов можно определять толщины детекторов от ~ 0.3 мм и более.

Точность метода составляет 5–10%.

Определение “объемного” энергетического разрешения толстых полупроводниковых детекторов

Поскольку реакции под действием быстрых нейтронов происходят с равной вероятностью во всех точках чувствительной области детектора, форма (полуширина (FWHM)) пиков в спектре реакций $^{28}Si(n,p)^{28}Al$ и $^{28}Si(n,\alpha)^{25}Mg$ дает информацию об “объемном” энергетическом разрешении детектора.

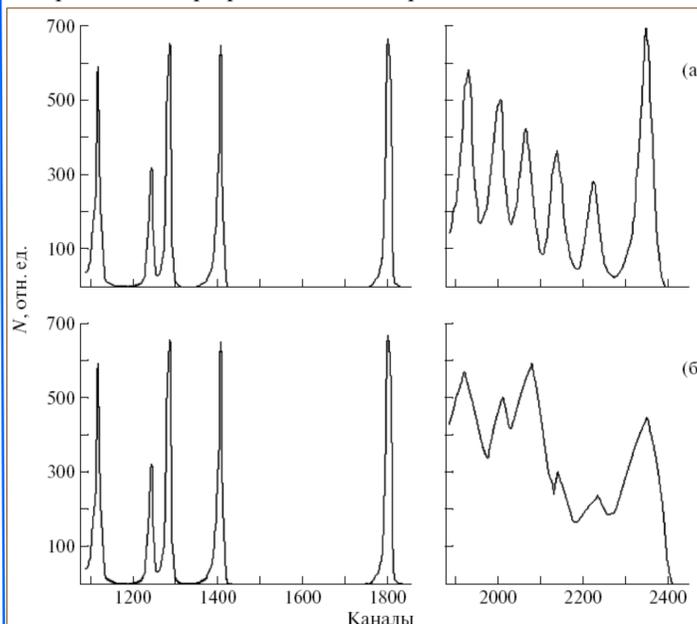


Рис. 2. Спектры, полученные с использованием качественного детектора (а) и детектора с плохим объемным разрешением (б). Слева – спектры α -частиц от источника ^{226}Ra , справа – высокоэнергетические части спектров заряженных частиц из реакций $^{28}Si(n,p)^{28}Al$ и $^{28}Si(n,\alpha)^{25}Mg$.

На рис. 2 приведены в сравнении “объемное” и “поверхностное” энергетические разрешения для двух исследованных нами детекторов разного качества, но с примерно одинаковыми толщинами чувствительной области ($W = 4$ мм (рис. 2а) и $W = 3.8$ мм (рис. 2б)).

Видно по спектрам от α -источника (левые), что “поверхностное” разрешение обоих детекторов приблизительно одинаково (FWHM 50 и 60 кэВ соответственно).

“Объемное” разрешение α -источник даёт не корректно из-за того, что α -частицы взаимодействуют с веществом детектора лишь в приповерхностном слое входного окна.

Из спектров заряженных частиц под действием быстрых n (правые спектры) “объемное” разрешение первого детектора ~ 50 -70 кэВ (с учётом разброса энергии пучка нейтронов меньше 100 кэВ [характеристика НГ-150]), а второго детектора хуже и соответствует значению > 400 кэВ.

Использование протонов отдачи для измерения толщины «пролетных» полупроводниковых детекторов

Перпендикулярно потоку нейтронов, перед измерительным детектором, помещается водорода-содержащая плёнка (например, полиэтилен) толщиной ~ 20 -40 мкм, расположенной между источником нейтронов от НГ-150 и исследуемым детектором. В плёнке образуются быстрые протоны отдачи, имеющие под нулевым углом отдачи ту же энергию, что и налетающий нейтрон (~ 14 МэВ из $T+D$ -реакции).

Энергетический спектр протонов легко идентифицируется и регистрируется $\Delta E-E$ – телескопом на фоне заряженных частиц – продуктов взаимодействия нейтронов с материалом ΔE детектора, поскольку сечение процесса выбивания протона велико (~ 220 Мб/ср для нейтронов). Если установить перед телескопом детектор, то по энергетическому сдвигу δE пика протонов отдачи легко вычислить его толщину.

Таким способом можно измерять толщины до ~ 1.1 мм, так как пробег протонов с энергией $E_p \sim 14$ МэВ в кремнии составляет 1.30 мм (регистрируемые телескопом протоны не должны полностью терять энергию в ΔE -детекторе телескопа, чтобы быть зарегистрированными спектрометром).

Ниже на рис. 3 приведена схема эксперимента и пики протонов отдачи для двух детекторов различной толщины.

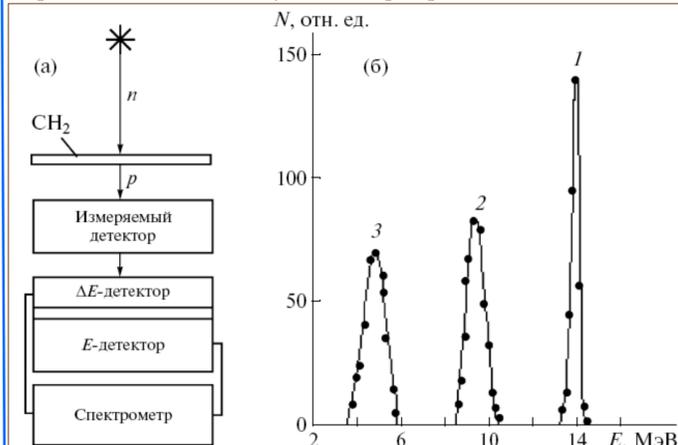


Рис. 3. Определение толщины пролетных детекторов с использованием протонов отдачи: а – геометрия измерения, толщина пленки CH_2 составляет 40 мкм; б – пики протонов отдачи ($E_p \approx 14$ МэВ), измеренные без поглотителя (1) и с использованием в качестве поглотителей детекторов различной толщины, мм: 2 – 0.64, 3 – 1.06.

Ниже на рис. 4 показана зависимость энергетического сдвига δE протонного пика от толщины измеряемого детектора, вычисленная по значениям пробегов протонов в кремнии.

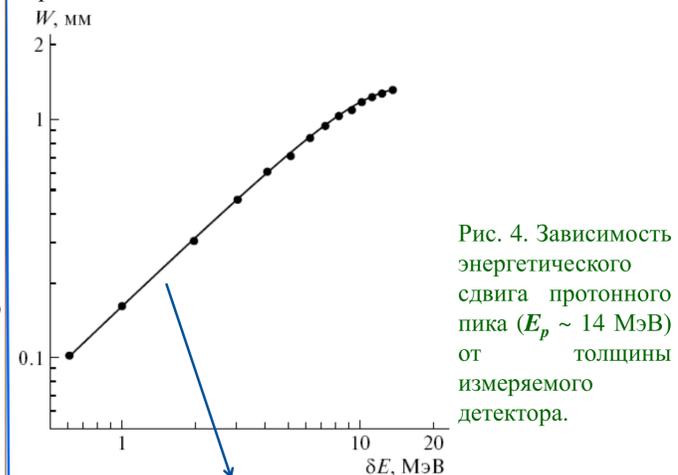


Рис. 4. Зависимость энергетического сдвига протонного пика ($E_p \sim 14$ МэВ) от толщины измеряемого детектора.

Данная зависимость хорошо аппроксимируется полиномом третьей степени:

$$W = 1.601(0.18E) - 0.391(0.18E)^2 - 0.064(0.18E)^3, \text{ где:}$$

W , мм – толщина измеряемого детектора;

δE , МэВ – энергетический сдвиг протонов пика.

Заключение:

Эти методы являются альтернативой или существенным дополнением к методикам определения толщины чувствительной области и энергетического разрешения кремниевых детекторов с использованием стандартных α -, β - и γ -источников.

Литература:

- С.В. Артемов, Г.А. Радюк и др., “Лабораторные ядерно-физические методы определения характеристик кремниевых детекторов заряженных частиц”, Приборы и Техника Эксперимента, 2013, № 4, стр. 32-42.
- А.Г. Бажажин, О.Ш. Жураев, А.А. Караходжаев, “Использование нейтронного генератора НГ-150 (ИЯФ АН РУз, г. Ташкент) в анализе веществ и определении толщины полупроводниковых детекторов заряженных частиц”, Труды XIX Международной научной конференции молодых ученых и специалистов (ОМУС-2015), 16-20 февр., 2015, Дубна, Россия, в печати.